



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV BIOMEDICÍNSKÉHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF BIOMEDICAL ENGINEERING

METODY ZVYŠOVÁNÍ ROZLIŠENÍ DIGITÁLNÍCH SNÍMKŮ

SUPER-RESOLUTION METHODS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

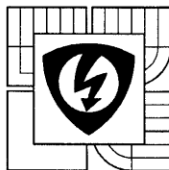
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

PAVEL FRANĚK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. MARTIN MÉZL

BRNO 2011



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ
Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií
Ústav biomedicínského inženýrství

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Biomedicínská technika a bioinformatika

Student: Pavel Franěk

Ročník: 3

ID: 115091

Akademický rok: 2010/11

NÁZEV TÉMATU:

Metody zvyšování rozlišení digitálních snímků

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s matematickými metodami, které slouží pro zvyšování rozlišení digitálních snímků. Teoreticky popište interpolační metody a vybrané metody implementujte v programovém prostředí Matlab. Dále se zaměřte na pokročilé metody zvyšování rozlišení - tzv. metody super rozlišení. Vybranou metodu také implementujte a pomocí některého z objektivních kritérií srovnajte kvalitu výstupních obrazů.

Výstupem práce bude uživatelské rozhraní (GUI), které bude obsluhovat jednotlivé metody a umožňovat přehledné srovnání výsledků. Diskutujte možnosti a limitace použité metody pro zvýšení rozlišení u snímků z různých lékařských modalit.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] GLASNER, D., BAGON, S., IRANI M.. Super-Resolution from a Single Image. IEEE 12th International Conference on Computer Vision, 2009. Kyoto, p. 349-356.
- [2] JAN, J. Medical Image Processing, Reconstruction and Restoration: Concepts and Methods. Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2006. ISBN: 0-8247-5849-8 (vybrané kapitoly).
- [3] UNSER, M., ALDROUBI, A., EDEN, M.. Enlargement or Reduction of Digital images with Minimum Loss of Information. IEEE Trans. Image Processing 1995, vol. 4, no. 3, pp. 247-258.

Termín zadání: 7.2.2011

Termín odevzdání: 27.5.2011

Vedoucí práce: Ing. Martin Mézl

Konzultanti bakalářské práce:

prof. Ing. Ivo Provazník, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Abstrakt

Cílem této bakalářské práce je se seznámit s metodami, které umožňují zvýšení rozlišení digitálních snímků. Také realizovat jednotlivé interpolační metody i Super-rozlišení pomocí programu Matlab a poukázání na zhodnocené výsledky. Diskutovat o možnostech použití metod Super-rozlišení pro obrazy s lékařských modalit.

Klíčová slova

Obraz, Rozlišení, Interpolace, Nejbližší soused, Bilineární interpolace, Bikubická interpolace, Super-rozlišení, Robust, Iterated back projection, Popoulis-Gerchberg, CMSE

Abstract

The main goal of this bachelor's thesis is acquaint with method, which enable increasing resolution digital photos. Also realize individual interpolation method and Super-resolution by the help of programme Matlab and reference on estimation record. Discuss possibility using method super- resolution for imagery with medical modality.

Keywords

Picture, resolution, interpolation, nearest neighbor, Bilinear interpolation, Bicubic interpolation, Super-resolution, Robust, Iterated back projection, Popoulis-Gerchberg, CMSE

Bibliografická citace

FRANĚK, P. *Metody zvyšování rozlišení digitálních snímků*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 45 s. Vedoucí bakalářské práce
Ing. Martin Mézl.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Metody zvyšování rozlišení digitálních snímků jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne

.....

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Martinu Mézlovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne

.....

podpis autora

Obsah

Úvod.....	8
1. Digitální obraz	9
1.1 Rozlišení	9
1.2 Zvyšování rozlišení obrazu	10
2. Metody zvyšování rozlišení obrazu	10
2.1 Metoda nejbližší soused	11
2.2 Bilineární interpolace.....	11
2.3 Bikubická interpolace.....	12
2.3.1Doostření obrazu.....	14
2.4 Super-rozlišení.....	15
3. Multi Image SR	15
3.1 Registrace obrazů	16
3.2 Robust Super-resolution	17
3.2.1Fast Robust Super-resolution	19
3.3 Iterativní zpětná projekce	20
3.4 Popoulis-Gerchberg	21
4. Implementace metod v Matlabu	22
4.1 Metoda nejbližší soused	22
4.2 Metoda bilineární	23
4.3 Metoda bikubická	24
4.4 Robust Super-rozlišení	26
4.5 Iterační zpětná projekce Super-rozlišení.....	27
4.6 Realizace uživatelského rozhraní.....	28
4.6.1Blokové schéma aplikace Metody zvyšování rozlišení	29
4.6.2Popis aplikace.....	30
5. Hodnocení kvality obrazu	31
5.1 Subjektivní hodnocení	31
5.2 Objektivní hodnocení.....	34
5.2.1Metody	34
5.2.2Hodnocení zvětšených obrazů.....	35
6. Použití metody Super-rozlišení na lékařské snímky	36
Závěr.....	37
Seznam literatury.....	38
Přílohy	40
A. Výsledky interpolačních metod v Matlabu.....	40
B. Výsledky metod Super-rozlišení v Matlabu.....	44

Seznam obrázků

Obrázek 1: Schéma počítání nejbližší vzdálenosti hledaného pixelu.....	11
Obrázek 2: Bilineární interpolace	12
Obrázek 3: Bikubická interpolace [2].....	13
Obrázek 4: Základní schéma metody super-rozlišení	15
Obrázek 5: Rozložení frekvencí [20]	17
Obrázek 6: Schéma procesu obrazu	18
Obrázek 7: Popoulis-Gerchberg algoritmus [23]	21
Obrázek 8: Schéma obrázku pomocí metody nejbližší soused	23
Obrázek 9: Schéma obrázku pomocí bilineární metody.....	24
Obrázek 10: Schéma obrázku pomocí bikubické metody	25
Obrázek 11: Výpočet pixelu pomocí bikubické interpolace.....	25
Obrázek 12: Výpočet pixelu pomocí průměrování 16 okolních	25
Obrázek 13: Blokové schéma metody Robust	26
Obrázek 14: Blokové schéma metody Iterační zpětné projekce	27
Obrázek 15: Aplikace Metody zvyšování rozlišení	28
Obrázek 16: Srovnání metod.....	28
Obrázek 17: Blokové schéma aplikace.....	29
Obrázek 18: Srovnání obrazu pomocí metod v aplikaci.....	33
Obrázek 19: Digitální mamografie.....	36
Obrázek 20: Obrázek a výřez, který je použit jako originál [26].....	40
Obrázek 21: Pomocí metody nejbližší soused zvětšení originálního obrazu.....	41
Obrázek 22: Pomocí metody bilineární zvětšení originálního obrazu	41
Obrázek 23: Pomocí metody bikubické zvětšení originálního obrazu	42
Obrázek 24: Metoda nejbližší soused zvětšení originálního obrazu2	42
Obrázek 25: Metoda bilineární zvětšení originálního obrazu2	43
Obrázek 26: Metoda bikubická zvětšení originálního obrazu2	43
Obrázek 27: Srovnání interpolačních metod obrazu ruky	44
Obrázek 28: Originální obraz globus	44
Obrázek 29: Sada čtyř LR obrazů	45

Úvod

Metody zvyšování rozlišení jsou poslední době intenzivně zkoumány a vyvíjeny různé algoritmy, v důsledku větších požadavků na kvalitu obrazových dokumentů. Můžeme se s nimi setkat v různých odvětvích. Nejvíce však v grafice a hlavně v digitální fotografii. I ten nejjednodušší grafický editor má v sobě implementovány metody pro zvyšování rozlišení. Tato práce seznamuje, s tím co je obraz, z čeho se skládá a jaké je jeho rozlišení. Dále také, jak se dá dané rozlišení zvýšit a jaké se k tomu používají matematické operace. Práce dále obsahuje popis a implementaci nejpoužívanějších interpolačních metod a metod Super-rozlišení do programu Matlab. Je vytvořena aplikace umožňující načtení obrazem a provedení zvýšení rozlišení některými níže popsanými metodami. Aplikace vytváří i srovnávací obraz metod. Výsledky práce jsou subjektivně a objektivně zhodnoceny a jsou implementovány další metody pro vylepšení subjektivního dojmu ze snímku. Dále je popsána možnost využití metod Super-rozlišení v medicíně při zpracovávání lékařských obrazů. V příloze práce jsou provedeny výsledky testování použitých metod v Matlabu na různých obrazech.

1. Digitální obraz

Obraz je často barevný, ale může být i černobílý, resp. ve stupnicích šedi. Obraz šedotónový se skládá z jedné barevné složky (kanálu), který je kvantován např. pomocí 8 bitů pro hodnotu barvy pixelu, tedy od 0 do 255. Na rozdíl od barevného obrazu, který pracuje převážně s 3 kanály (RGB). Pak je hodnota barvy pixelu od 0 do 255 pro každý kanál (barvu) zvlášť, což představuje počet bitů 24. [2]

Proces digitalizace obrazu se provádí pomocí kvantování a vzorkování. Kvantování je diskretizace oboru hodnot obrazové funkce a intervalům oboru funkčních hodnot přiřadí danou hodnotu. Vzorkováním vzniká pixel a dle způsobu přiřazení jeho hodnoty se dělí vzorkování na bodové a plošné. Na vzorkování závisí rozlišení i velikost souboru. [13]

1.1 Rozlišení

Základní jednotkou obrazu je pixel. Obraz pořízený digitálními fotoaparáty není nic jiného, než množina barevných bodů uspořádaných do pravidelné mozaiky. Tedy jeden bod obrazu se nazývá pixel (Picture Element) a nese veškerou informaci o barvě a jasů bodu. Přesnost s jakou je schopen jeden pixel zaznamenat barvu se nazývá barevná hloubka (Color Depth). Obraz tvoří velké množství pixelů – čím jich je více, tím větší množství jemných detailů je obraz schopen zaznamenat. [6]

Rozlišení se udává v různých variantách, z nichž nejjednodušší je matice pixelů, tedy např. 2000 x 3000 pixelů (bodů obrazu).

Dalšími variantami je jako Body obrazu na palec (*Pixel per Inch – PPI*), což představuje hustotu pixelu vztaženou na délku 1 palce (1 palec = 2,54 cm) a Tiskové body na palec (*Dots per Inch - DPI*). DPI není tak nic jiného, než s jakou hustotou je tiskárna schopná stříkat inkoustové body na papír. DPI musí být vždy větší než PPI, aby tiskárna měla dostatečnou rezervu na vytvoření každého barevného pixelu z několika tiskových bodů. [6]

1.2 Zvyšování rozlišení obrazu

Někdy se nám stane, že rozlišení je příliš malé a je potřeba ho nějak zvětšit. Hlavním problémem při zvětšování je, že je potřeba vykreslit některé body, které jsou neznámé (neexistují), a tak se musí nějak odvodit (spočítat). Dnes existuje řada různých softwarových nástrojů, umožňujících tento problém řešit. Nejčastěji využívají metodu tzv. resampling neboli převzorkování. Druhou nejužívanější metodou je převod na rozlišení nezávislého formátu, z kterého se generuje obrázek v požadovaném rozlišení. Tento princip spočívá v tom, že při změně rozlišení obrázku se změní i počet pixelů. Tedy při zvětšení jsou pixely dopočítány a při zmenšení se můžou také dopočítávat. Způsob této transformace se označuje jako interpolace. [10]

2. Metody zvyšování rozlišení obrazu

Zvýšení rozlišení lze provést pomocí procesu interpolace. Základem interpolace je matematickým výpočtem navýšit počet zobrazených bodů (pixelů) v obraze. Problém je však v tom, že zvýšením rozlišení se nezvyšuje kresba detailu, naopak se kvalita obrazu celkově zhoršuje. Záleží také na použité metodě interpolace. Každá interpolace přesto vychází z charakteristik pixelů původního obrázku a dopočítává charakteristiky přidáných či vypuštěných bodů obrázku nového. Interpolační metody lze rozdělit na dvě skupiny *adaptivní* a *neadaptivní*.

Adaptivní - závislé na struktuře interpolovaného obrazu (ostré hrany vs. hladké textury)

Neadaptivní - nezávislé na struktuře interpolovaného obrazu (zpracovávají celý obraz stejně)

Práce je zaměřena na neadaptivní interpolaci. [9]

Výpočet barvy přidáného pixelu se provádí vždy z okolních pixelů. Velikost okolí je dáno použitou metodou interpolace. Každému pixelu, z něhož se počítá neznámá hodnota, je přiřazena váha. Váha je číslo, které určuje nakolik je daný pixel vzdálen od počítaného. Výsledná barva se potom vypočítá součtem jednotlivých váhovaných pixelů.

K nejpoužívanějším metodám interpolace patří zejména bilineární (bilinear), bikubická (bicubic), Hermite, Lanczos a Supersampling. [1][7]

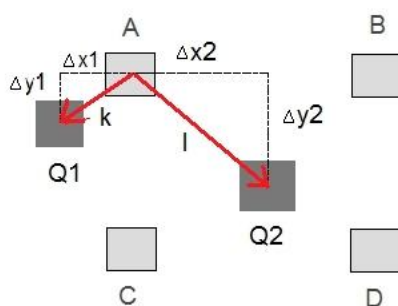
2.1 Metoda nejbližší soused

Metoda nejbližší soused (*nearest neighbor interpolation*) je interpolace nultého řádu a je nejjednodušší metodou. Dochází jen k duplikaci nejbližších pixelu. To znamená, že do námi požadovaného pixelu je zkopírována hodnota od pixelu, který se nachází co nejbliže. Jedná se o metodu velice rychlou, ale vede k nežádoucím artefaktům. [1][2]

Nejkradší vzdálenost se dá počítat různě, nejznámější je pomocí euklidovské vzdálenosti, která je uvedena pomocí vzorce (1).

$$k = \sqrt{(\Delta x_1)^2 + (\Delta y_1)^2} \quad (1)$$

Na Obrázku 1 je naznačeno určení vzdálenosti jednotlivých pixelů. Vzdálenosti l a k jsou zvýrazněny. Je patrné, že pro konkrétní pixel A bude použita hodnota z nejbližšího pixelu Q1.



Obrázek 1: Schéma počítání nejbližší vzdálenosti hledaného pixelu

Při celočíselném násobném zvětšení se tato vzdálenost nemusí počítat, protože neznámí pixel má stejnou vzdálenost od všech původních. Tato velikost se však musí vhodně nastavit.

2.2 Bilineární interpolace

Bilineární interpolace (*bilinear interpolation*) je rozšíření předchozí metody o výpočet neznámého pixelu pomocí interpolace lineární funkcí v obou směrech.

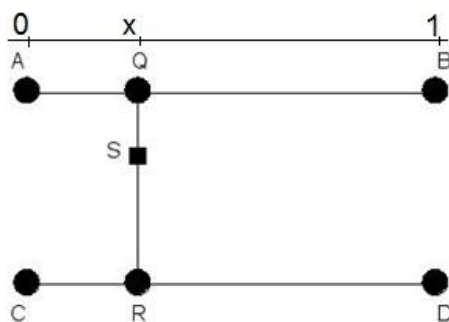
Pokud metoda nejbližšího souseda byla nultého řádu, bilineární je interpolací prvního řádu, kde se využívá lineární funkce. Lineární funkce je dána přímkou. Proto, že se pracuje v 2D prostoru a pro každou osu se používá lineární interpolace, tak je použito označení bilineární. Bilineární interpolace používá čtyři nejbližší sousední pixely, tedy matici (2x2). [2]

Pokud hledá hodnotu bodu Q, pak je patrné, že bude ležet někde na úsečce mezi body A a B, jak je znázorněno na Obrázku 2. Písmena použitá na obrázku značí jejich funkční hodnoty, tedy jejich barvu. Váha každého krajního pixelu se spočítá pomocí vzorce (2), kde w

je výsledná váha a x je desetinná část souřadnice, v nichž se bod Q nalézá. Váha tedy odpovídá v podstatě vzdálenosti pixelu. [2]

$$w = 1 - x \quad (2)$$

Nejprve je tedy vypočítána lineární interpolace bodu Q a R , každý podle svých nejbližších sousedů ve vodorovné ose, jak je uvedeno ve vzorci (3) a (4) a pak se hledaný bod S vypočítá pomocí lineární interpolace bodu Q a R . Tento výpočet je znázorněn vzorcem (5). [2]



Obrázek 2: Bilineární interpolace

$$Q = wA + wB \quad (3)$$

$$R = wC + wD \quad (4)$$

$$S = wQ + wR \quad (5)$$

Výpočet hodnoty S je možný, také pomocí vzorce (6), kde x a y jsou souřadnice bodu S . [5]

$$S = (1 - x)(1 - y)C + x(1 - y)D + (1 - x)yA + xyB \quad (6)$$

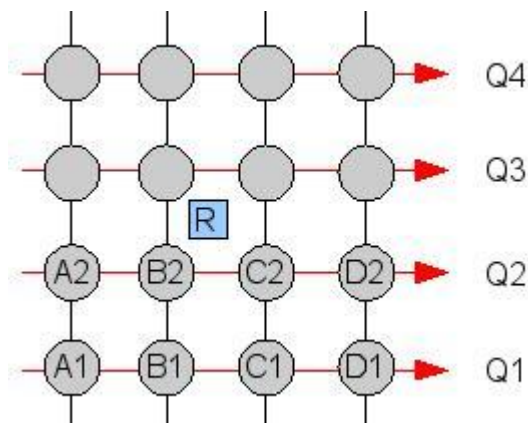
Tato metoda je také relativně výpočetně nenáročná, ale díky průměrování dochází k rozmazání hran v obraze.

2.3 Bikubická interpolace

Bikubická interpolace (*bicubic interpolation*) používá ke stanovení hodnoty neznámého pixelu matici o velikosti (4×4) . Tedy hodnotu počítá z 16 nejbližších bodů. Jedná se o polynomiální interpolaci třetího stupně. Výpočet je prováděn pomocí kubického polynomu, viz rovnice (7).

$$y = ax^3 + bx^2 + cx + d \quad (7)$$

Největším rozdílem od předchozích metod je, že se interpolace neprokládá přímkou, ale kubickou křivkou zadanou čtyřmi body v jedné dimenzi. Pro přesný výpočet je nejlepší, aby byl hledaný bod mezi dvěma prostředními body. Toto schéma je znázorněno na Obrázku 3.



Obrázek 3: Bikubická interpolace [2]

I zde je použita výpočetní metoda nejprve na řádky a v druhé fázi na sloupce. Každý řádek je proložen kubickou funkcí (polynom) a vypočtenou hodnotou hledaného bodu. Pro určení polohy nás zajímá pouze vodorovná souřadnice, nacházíme se v jedné dimenzi. Tento postup je proveden pro ostatní řádky a dostanou se čtyři body Q1 až Q4. [2]

Spočítání vah není už tak jednoduché. V jedné dimenzi se počítá váha pro čtyři pixely. První z nich, v našem případě bod A, se zjistí, jak daleko je od interpolovaného bodu. Vzdálenost je od 0 do 2, protože interpolovaný bod leží mezi dvěma prostředními pixely. Pokud vzdálenost je mezi 0 a 1 použijeme pro výpočet váhy vzorec (8). A pro vzdálenost od 1 do 2 použijeme vzorec (9). [2]

$$w = ((A + 2)x - (A + 3))x^2 + 1 \quad 0 < x < 1 \quad (8)$$

$$w = ((Ax - 5A)x + 8A)x - 4A \quad 1 < x < 2 \quad (9)$$

Je patrné, že bikubická interpolace je výpočetně náročnější, ale z hlediska zachování hran dává tato metoda lepší výsledky než bilineární interpolace.

2.3.1 Doostření obrazu

Pro zlepšení ostrosti obrazu lze využít filtrování v prostorové oblasti. Tento typ filtrů se vyznačuje tím, že filtrovaný pixel je závislý na hodnotách sousedních pixelů. Filtr je většinou chápán jako čtvercová matice (maska). Samotná konvoluce obrazu je pak prováděná tak, že se maska posouvá, bod po bodu ve zdrojovém obraze. [4]

Výsledná hodnota se pak počítá pomocí konvoluce obrazu a masky.

Konvoluce obrazu o rozměrech $M \times N$ provede pomocí vzorce (10). [4]

$$g(x, y) = \sum_{s=-a}^a \sum_{t=-b}^b w(s, t) f(x + s, y + t), \quad a = \frac{(m-1)}{2}, b = \frac{(n-1)}{2} \quad (10)$$

Pro všechna $x=0, 1, 2, \dots, M-1$ a $y=0, 1, 2, \dots, N-1$. w je váhová maska posouváná po vstupním obraze

Doostření však může v obraze zesílit šum, který je v obraze přítomný, ale oko ho tak nevnímá. Řešením tohoto problému je použití adaptivního zostřování nebo potlačení šumu.

K doostřování obrazu je možné použít následující ostřicí masky:

$$\begin{vmatrix} 0 & -1 & 0 \\ -1 & 5 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \end{vmatrix} \quad \begin{vmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & 9 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{vmatrix} \quad \begin{vmatrix} -1 & -2 & -1 \\ -2 & 13 & -2 \\ -1 & -2 & -1 \end{vmatrix}$$

Kdy součet v matici je roven 1. Uvedené ostřicí masky jsou výsledkem odečtení masky Laplacián (jako součet kolmých druhých diferencí) od originálu.

Laplacián $L\{f_{i,k}\} : \begin{vmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & -4 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{vmatrix}$

$$\begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{vmatrix} - \begin{vmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & -4 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 & -1 & 0 \\ -1 & 5 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \end{vmatrix}$$

2.4 Super-rozlišení

Interpolace fotografie s vysokou mírou barevného šumu (např. při vyšší citlivosti ISO) je poměrně složitá a ve fotografii je vyšší výskyt rušivých prvků. Proto je vhodné najít nějakou optimální metodu interpolace, která produkuje nízkou úroveň artefaktů v obraze, a zachovává ostřejší hrany a dokáže případně potlačit šum. Jednou z těchto metod je tzv. Super-rozlišení (super resolution methods). [7]

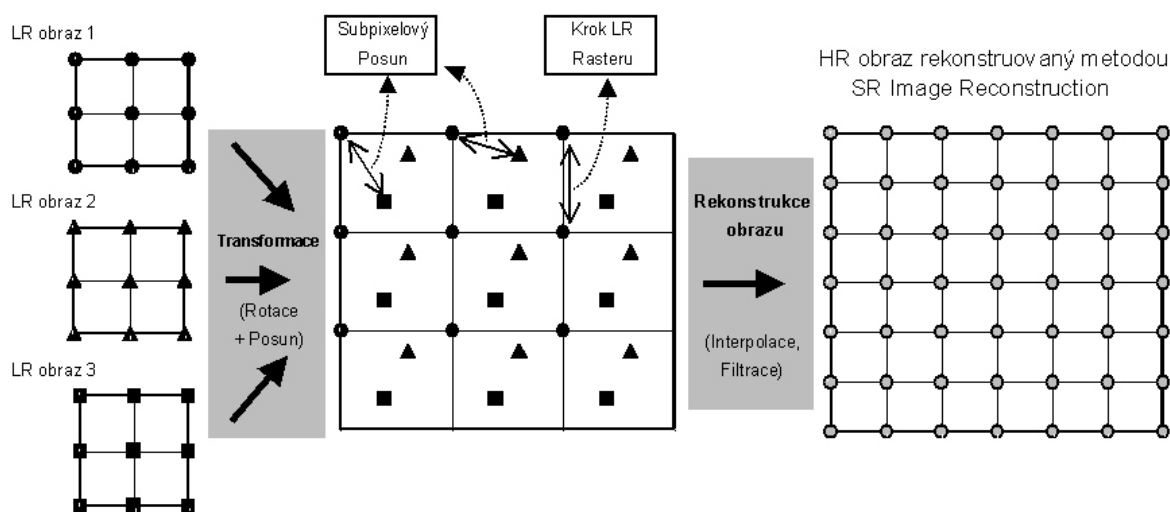
Metoda je založena na několikanásobném vyfotografování totožné scény nebo použití několika stejných snímků (**Multi Image SR**) a následné jejich kombinaci (v počtu 4 až 9) do sebe. Výsledkem pak vznikne snímek s lepší kvalitou interpolace. Také je ze snímku vyhlazen veškerý digitální šum. [7]

Super - rozlišení využívá algoritmů, kde jsou pixely mezi jednotlivými obrazy posunuty. [7]

Další možností je použití jen jednoho obrazu (**Single Image SR**).

3. Multi Image SR

Rekonstrukce obrazu pomocí metody super-rozlišení (super-resolution image reconstruction - SR) provádí odhad obrazu s vysokým rozlišením (high resolution image – HR) s pomocí obrazů s menším rozlišením (low resolution image – LR). Základní podmínkou pro využití metody je několik jednotlivých obrazů nižšího rozlišení zachycujících požadovanou scénu. Další nezbytnou podmínkou je vzájemný subpixelový posun mezi jednotlivými digitálními obrazy. Jelikož velikost tohoto posunu pravděpodobně neodpovídá kroku HR rasteru, je nutné použít interpolace. Situace je znázorněna na Obrázku 4.[14]



Obrázek 4: Základní schéma metody super-rozlišení

Přestože se celý SR algoritmus skládá z mnoha náročných implementovatelných výpočtů (transformační parametry, subpixelový posun, interpolační algoritmus, šum, ...), jeho aplikace je nemalým přínosem nejen z důvodů finančních (využití starších nebo levnějších přístrojů), ale také díky možnosti využití již existujících digitálních snímků tam, kde provedení nové kvalitnější digitalizace již není možné. [14]

3.1 Registrace obrazů

Nedílnou součástí zpracování snímků je registrace obrazů. Dá se říci, že se jedná o překrytí snímků přes sebe tak, aby si totožné snímky odpovídaly. Při registraci je nejdůležitějším okamžikem nalezení významných objektů na každém snímku a jejich spárování přes všechny zpracováváné snímky. Jestliže se tento krok povede, registraci lze snadno dokončit s využitím vhodné prostorové transformace snímků. Metod pro řešení této problematiky je několik a jejich úspěšnost a efektivita zaleží často na použité aplikaci.

Jelikož se jedná o obrazy, tedy dvourozměrná data a zpracovávání je diskrétní je pro počítání využívána dvourozměrná diskrétní Fourierova transformace.

Dvourozměrná diskrétní Fourierova transformace

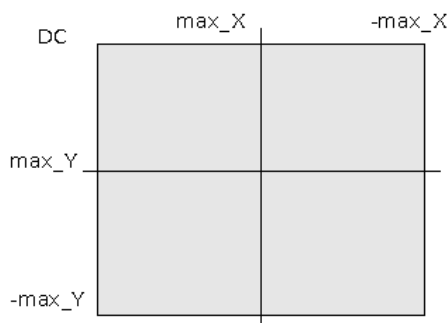
2D diskrétní Fourierova transformace zahrnuje řadu jednorozměrných Fourierových transformací, které se vypočítávají vždy pro každý řádek. Tento krok zprostředkuje tzv. střední obraz, kde na vodorovné ose je frekvence a na svislé ose prostor y . V druhém kroku se provádí jednorozměrná Fourierova transformace pro sloupce ve středním obrazu. Výsledný obraz je 2D diskrétní Fourierova transformace původního obrazu. Výpočet se provádí pomocí vzorce (11). [19]

$$F(u, v) = \frac{1}{MN} \sum_{x=0}^M \sum_{y=0}^N f(x, y) e^{-j2\pi \left(\frac{ux}{M} + \frac{vy}{N} \right)} \quad (11)$$

Jak u jednorozměrné Fourierovy transformace, tak i u dvourozměrné se využívá pro počítání metoda rychlé Fourierovy transformace (FFT), která šetří výpočetní čas. Počet operací pro FT je úměrný N^2 a pro FFT $n \cdot \ln(n)$. [19]

Posunutí výstupu FFT

Výstupem dvourozměrné FFT je matice, která má stejné rozměry jako vstupní matice. Každý prvek v této matici vyjadřuje velikost a fázi frekvence odpovídající pozici prvku. Rozložení frekvencí je vidět na Obrázku 5. [20]



Obrázek 5: Rozložení frekvencí [20]

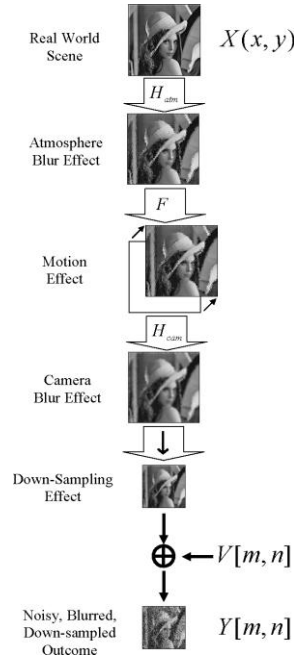
DC na Obrázku 5 je prvek nacházející se na pozici (0,0) tzv. stejnosměrnou složku (součet všech prvků původního obrázku), max_X jsou prvky matice, které obsahují koeficienty pro největší frekvenci ve vodorovném směru, obdobně max_Y označuje prvky matice s největší frekvencí ve svislém směru. Pro lepší práci s výstupní maticí je vhodné přemístit jednotlivé kvadranty. Potom DC složka je uprostřed matice. [20]

Pro realizaci této vlastnosti, lepší zobrazení spektra obrazu, se v programu Matlab dá využít funkce `fftshift`

3.2 Robust Super-resolution

Originální obraz podstoupí třem degradacím obrazu a dvě z nich jsou obsaženy v LR obraze. Je to rozmazání obrazu, změna rozlišení a šum. První degradace je zapříčiněna zmenšením prostorového rozlišení, které je způsobeno vícenásobným rozostřením zdrojového obrazu, tedy změnou PSF. Také pohybový efekt a integrační spojení může být příčinou. Metoda Robust je založena na oboustranném filtru, který vyvolává obraz po částech. Obraz je hladký a má ostřejší hrany. [15] [18]

Robust Super-resolution je metoda velmi úspěšná, ale není zavedená matematická úmluva pro přesný popis této metody. Metoda je zadána posloupností jednotlivých kroků. Sjednocení této robustní metody není realizováno nebo je omezeno Tikhonovou regularizací. V některých algoritmech se objevují i iterační metody, které lépe kompenzují šum, a to pomocí matice geometrického operátora pohybu, mezi HR a LR obrazy.



Obrázek 6: Schéma procesu obrazu

$$Y[m, n] = [H_{cam}(x, y) ** F(H_{atm}(x, y) ** X(x, y))] \downarrow + V[m, n] \quad (12)$$

$Y[m, n]$ je výsledný obraz, který je rozostřený a se šumem, $**$ je dvourozměrná konvoluce operátoru. F je proměnná, která udává deformaci obrazu. Šipka dolů je proměnná pro diskretizaci. $V[m, n]$ je systémový šum. [16]

V Robust metodě se dá použít i mediánový filtr. V metodě dané Tikhonovou regularizací přispívá vždy jeden obraz s nízkým rozlišením na obraz s vysokým rozlišením a další obrazy jsou v procesu rekonstrukce vypuštěny. Požadavkem na použití mediánu je, aby se ve všech obrazech nevyskytoval aditivní šum. Mediánová metoda je lepší než metoda, která je dána Tikhonovou regularizací, ale při přítomnosti aditivního šumu ztrácí metoda Robust svoji převahu. [17]

Metoda počítá algoritmus s pomocí gradientu. Gradient L je suma gradientu vypočítaných přes vstupní obrazy, znázorněno vzorcem (13). [17]

$$\nabla L(X) = \sum_{k=1}^p B_k \quad (13)$$

Nejjednodušší je gradient založený na iteraci, kdy se odhad řešení aktualizuje s každou iterací.

$$X^{n+1} = X^n - \lambda * \nabla L(X) \quad (14)$$

kde λ je faktor určující míru gradientu L . Výstupní obraz vysokého rozlišení je zpracován tak, že v každé iteraci jsou převzorkovány vstupní obrazy. Každý člen B_k v sumě ve vzorci (13) odpovídá zpětnému promítnutí rozdílu obrazu. [17]

V Robust metodě je suma obrazu ze vzorce (13) nahrazena vektorem středních hodnot pixelu viz. vzorec (15).

$$\nabla L(X)(x, y) \approx \text{median}\{B_k(x, y)\}_{k=1}^p \quad (15)$$

$$B_1 \ B_2 \ B_3 \ B_4 \ \underbrace{B_5}_{\text{median}} \ B_6 \ B_7 \ B_8 \ B_9$$

Mediánový odhad může být zkreslený, a to pokud jsou hranice uspořádány nesymetricky s ohledem na střed. [17]

3.2.1 Fast Robust Super-resolution

Pro reálné časové zpracování obrazu, které je u rychlých metod vždy žádoucí se provádí zvětšení ve dvou krocích:

- Non-iterativní fúze dat
- Iterační deblurring interpolace

Záměrem deblurring interpolace je nalezení zostření HR obrazu.

Následující vzorec (16) formuluje minimalizační kritérium pro získání obrazu X ze Z . [16]

$$\hat{\underline{X}} = \text{ArgMin}_{\underline{X}} \left[\|A(H\underline{X} - \hat{\underline{Z}})\|_1 + \lambda' \sum_{l=0}^p \sum_{m=0}^p \alpha^{m+l} \|\underline{X} - S_x^l S_y^m \underline{X}\|_1 \right] \quad (16)$$

Kde matice A je diagonální matice s diagonálními hodnotami rovnými druhé mocnině z počtu měření. K vytvoření přispívá každý prvek ze Z , proto nedefinovaný pixel nemá žádný efekt na odhad HR obrazu X . Naopak pixely, které jsou vytvořeny z početných měření, mají větší efekt v odhadu. [16]

3.3 Iterativní zpětná projekce

Další metodou Super-rozlišení je iterativní zpětná projekce. Ta pomáhá zlepšit rozdíl mezi simulovaným a aktuálním obrazem. Provádí se pomocí iterací (opakování) do takové doby, než je požadovaný výsledek. Vyžaduje vytvoření počátečního odhadu obrazu s vysokým rozlišením a simulující zobrazovací proces k tomu, aby získal sadu obrazu s nízkým rozlišením. [21]

Proces registrace obrazů se dá zapsat pomocí vzorce (17) .

$$g_k(m, n) = \sigma_k(h(f(x, y)) + n_k(x, y)) \quad (17)$$

Horizontální a vertikální posun a, b a uhlové otočení θ mezi obrazy g_1 a g_2 můžeme zapsat vzorcem (18).

$$g_2(x, y) = g_1(x \cos \theta - y \sin \theta + a, y \cos \theta + x \sin \theta + b) \quad (18)$$

Následující rovnice (19) udává minimalizaci rozdílu mezi obrazy

$$\begin{aligned} \sum g_x^2 a + \sum g_x g_y b + \sum A g_x \theta &= \sum g_x g_t \\ \sum g_x g_y a + \sum g_y^2 b + \sum A g_y \theta &= \sum g_y g_t \\ \sum A g_x a + \sum A g_y b + \sum A^2 \theta &= \sum A g_t \end{aligned} \quad (19)$$

Algoritmus iterace v metodě je dán tak, že na počátku není předpokládán žádný pohyb mezi obrazy. Pomocí řešení rovnic se spočítá pohybový posun a ten se přidá k existujícímu odhadu. Obraz g_2 se zdeformuje k obrazu g_1 , který má aktuální odhad pohybu. Algoritmus se vrací zpět k počítání rovnic a deformování obrazu g_2 . Proces skončí v okamžiku, kdy se korekce posunu a, b a úhlu otočení θ blíží 0. [21]

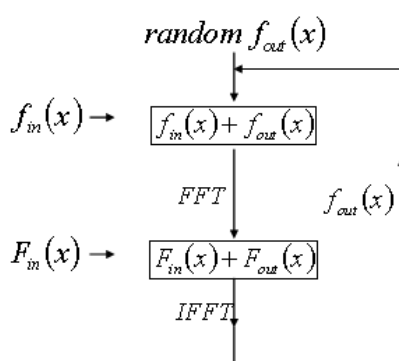
Vzorec (20) udává výpočet odhadu rozdílu obrazu, který se používá pro zlepšení odhadu zpětné projekce. [21]

$$e^{(n)} = \sqrt{\sum_k \sum_{(x,y)} (g_k(x, y) - g_k^{(n)}(x, y))^2} \quad (20)$$

3.4 Popoulis-Gerchberg

Známý algoritmus, který je velmi vhodný pro řešení extrapolace. Jde do určité míry o obnovení chybějících dat v nějakém jednom či vícerozměrném signálu. Algoritmem je iterační technika, která se mění mezi účelovou oblastí a Fourierovou transformací, ta omezuje signál do známých hodnot ke konečné šířce pásma. Jádrem počítání tohoto algoritmu je DFT, která je účinná a snadno realizovaná.

Konverguje pomalu a počítání vyžaduje několik stovek iterací. [22][23]



Obrázek 7: Popoulis-Gerchberg algoritmus [23]

Princip metody (algoritmu) spočívá v tom, že na začátku se naplní HR obraz hodnotami pixelu, které jsou známy a ostatní se nastaví hodnotami 0. V dalším kroku se obraz filtruje dolní propustí. Tento krok způsobí rozmazání obrazu, ale v dalším kroku se, při filtraci vysokou frekvencí, obraz zrekonstruuje. Celý tento proces probíhá v iteračním cyklu. Metoda má jednu nevýhodu a tou je značný artefakt blízko okrajů, kvůli strmé frekvenční oblasti.

Po použití této metody, je získán ostrý obraz v docela relativně krátkém čase. Původní obraz s vysokou rozlišovací schopností na to potřebuje jednou tak delší čas, protože jeho velikost je dvojnásobná (2M a 2N). Algoritmus dobře pracuje pro metodu Super-resolution. [22]

4. Implementace metod v Matlabu

Pomocí programového prostředí Matlab, byly realizovány předem popsané interpolační metody zvyšování rozlišení. A to pomocí mnou navrženou funkcí *zvetseni.m*. Funkce má tři vstupní parametry (vstupní obraz, číslo zvětšení, požadovaná metoda) a jednu výstupní (výstupní obraz). Příklad je znázorněn níže.

```
[vys_obraz]=zvetseni(imread('oko.jpg'),'4','soused')
```

Použité zkratky v parametru metoda:

metoda nejbližší soused - 'soused'

bilineární metoda - 'bilinear'

bikubická metoda - 'bicubic'

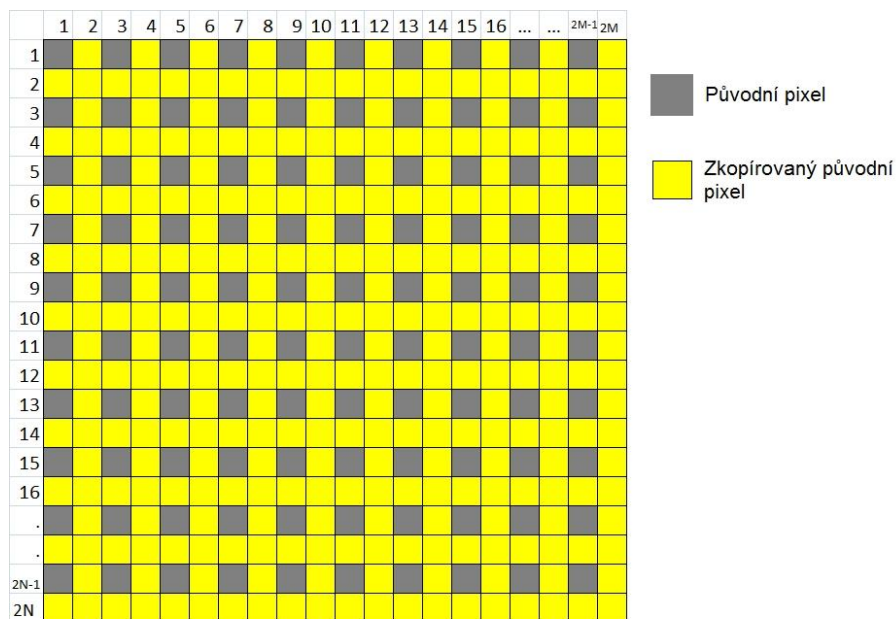
Zvětšení je realizováno pro následující hodnoty zvětšení:

- `soused` - 2, 3, 4, 6
- `bilinear` - 2, 3, 4, 6
- `bicubic` - 2, 4

V programovém prostředí Matlab je obrázek chápán jako matice $[N, M]$ a to pokud se jedná o černobílé (šedotónové) obrázky. Pokud je obrázek barevný má matice ještě třetí souřadnici a tou je složka barvy (RGB). Ta se dělí na jednotlivé kanály R, G a B. Při výpočtech je potřeba tento fakt zohlednit a pro každý barevný kanál počítat zvlášť. Matice pak má tedy tvar např. $[N, M, U]$. Hodnoty N a M udávají souřadnice pixelu.

4.1 Metoda nejbližší soused

Metoda nejbližší soused, jak už bylo předem zmíněno, je založena na duplikaci (kopírování) hodnoty pixelu nejbližšího. V programovém prostředí Matlab bylo toto realizováno pro dvojnásobné zvýšení rozlišení a to, že původní matice obrázku se zvětší 2x. A původní pixely jsou roztáhlé a mezi ně jsou přiřazeny nové pixely s hodnotou pixelu původního. Tento krok je realizován prvně pro sloupce a pak pro řádky. Schéma je vidět na Obrázku 8. Pro zvětšení 3x je to podobné. Zvětšení 4x je realizováno dvojnásobným zvětšením již 2x zvětšeného obrázku a zvětšení 6x pak trojnásobným zvětšením již 2x zvětšeného obrázku.

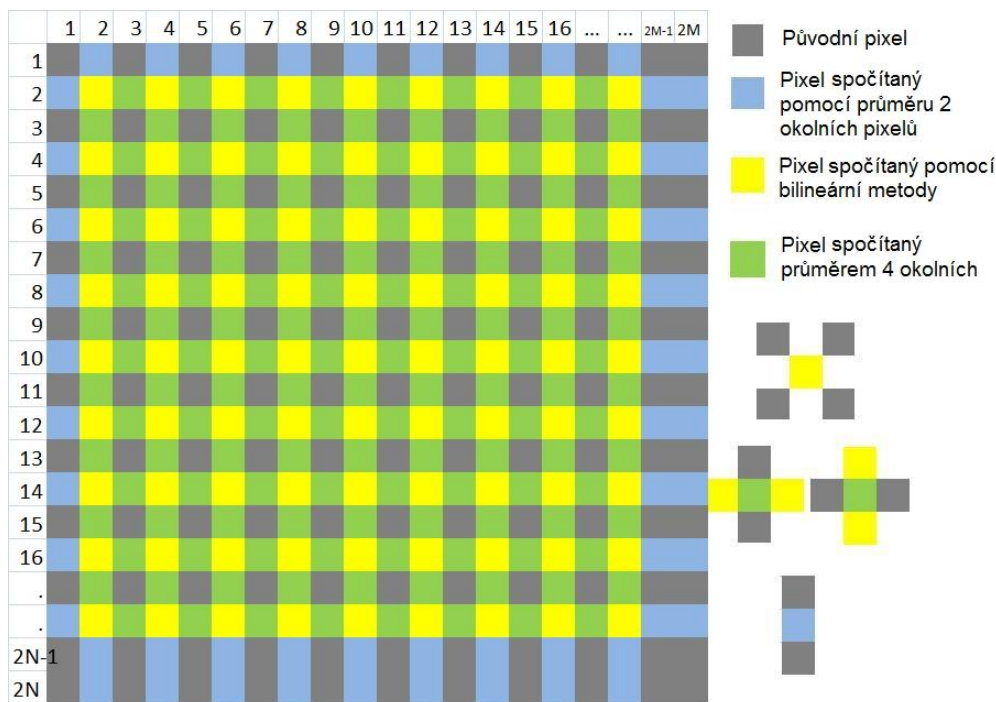


Obrázek 8: Schéma obrázku pomocí metody nejbližší soused

4.2 Metoda bilineární

Než je realizována metoda bilineární, která počítá hodnotu pixelu ze 4 okolních pixelů, je nutno prvně provést výpočet okrajových pixelů a zvětšení matice jak při metodě nejbližší soused. Výpočet neznámých okrajových pixelů je počítán pomocí lineární interpolace, tedy průměrem 2 okolních pixelů. Poslední řádek zvětšené matice obrázku je totožný s řádkem předchozím, to je realizované i na sloupec. Po vypočtení pixelu bilineární metodou pomocí vzorce 5, kam za x a y je dosazena hodnota 0,5, je potřeba, aby se ještě vypočítaly pixely, které jsou na Obrázku 9 znázorněné zelenou barvou. Výpočet je proveden stejně, jen už je počítáno i s vypočtenými pixely pomocí bilineární metody.

Další zvětšení je realizováno podobně, jak u předchozí metody.

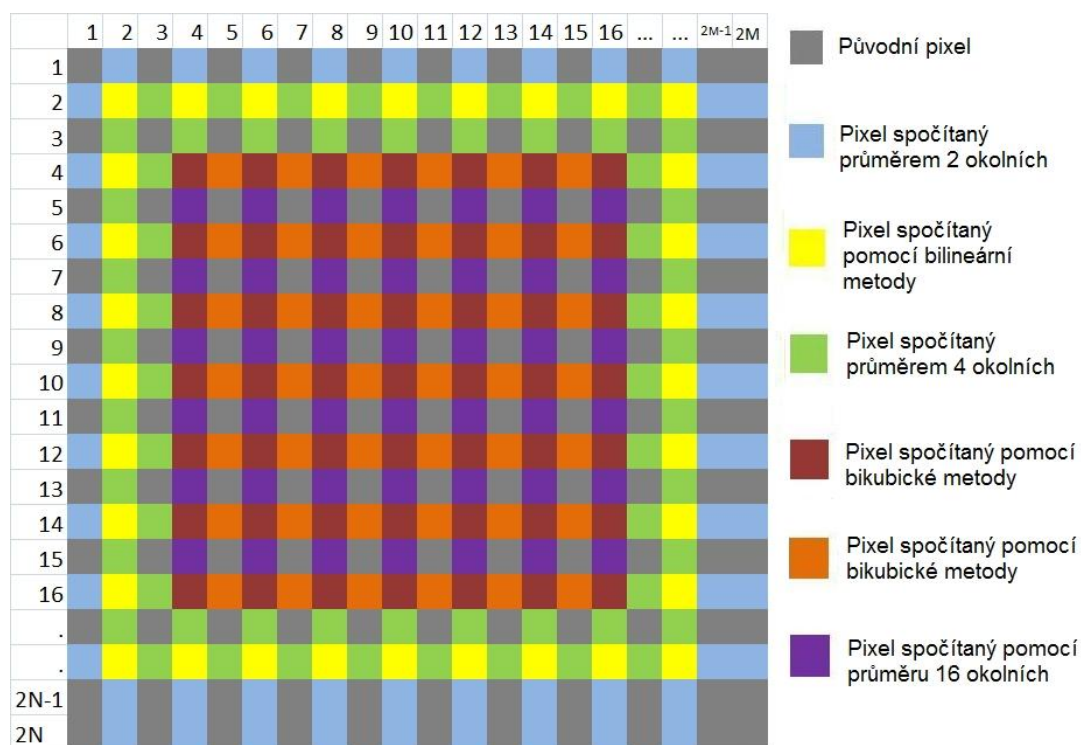


Obrázek 9: Schéma obrázku pomocí bilineární metody

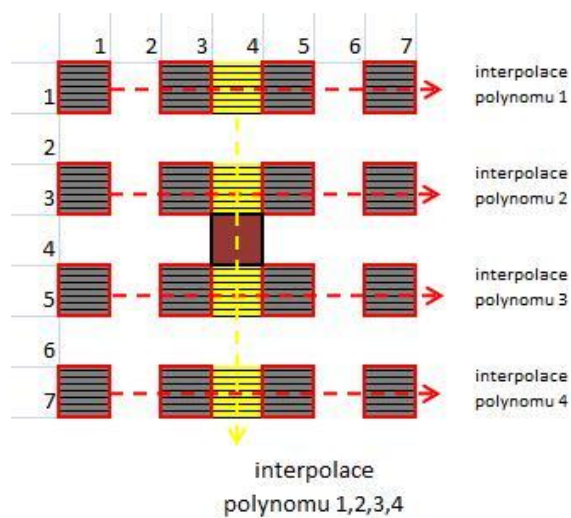
4.3 Metoda bikubická

Metoda bikubická není, už tak jednoduchá počítá neznámý pixel pomocí 16 okolních. Nejprve jsou spočítány interpolace okrajových bodů obrazu, které nám potom umožní použití bikubické interpolace. Situace je schematicky naznačena na Obrázku 10. Výpočet pixelu pomocí bikubické metody je znázorněn na Obrázku 11. Ze čtyř hodnot pixelu v řádce se určí pomocí funkce *polyfit* v Matlabu kořeny polynomu a pak se pomocí funkce *polyval* vypočítá polynom. Tento krok je proveden pro 4 řádky a dále to samé je provedeno pro sloupec, už vypočítaných hodnot. Výpočet pixelu, který je označen fialově na Obrázku 12 se spočte průměrováním 16 okolních pixelů, kde 4 nejbližší mají větší váhu. Pixel, který je na Obrázku 10 označen oranžově se počítá stejně, jak na Obrázku 11.

Zvětšení 4x je realizováno dvojnásobným zvětšením již 2x zvětšeného obrázku.



Obrázek 10: Schéma obrázku pomocí bikubické metody



Obrázek 11: Výpočet pixelu pomocí bikubické interpolace

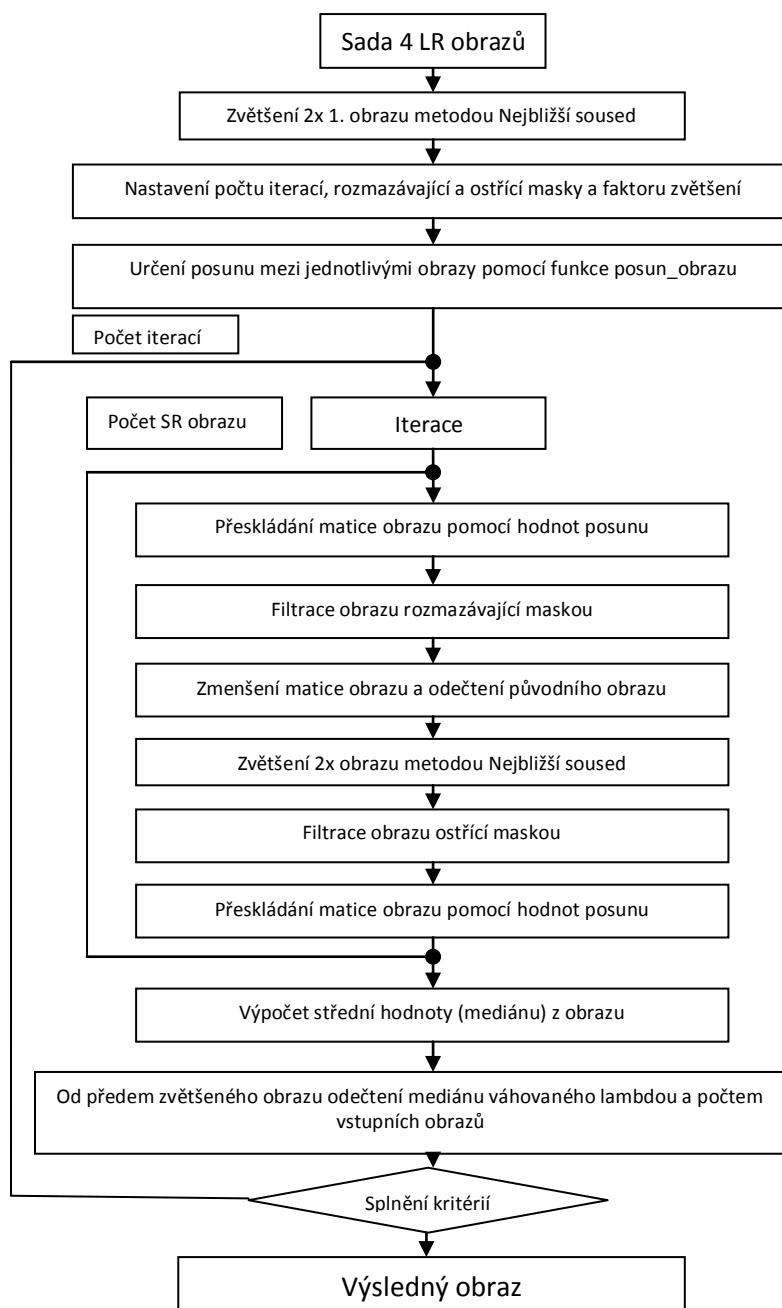


Obrázek 12: Výpočet pixelu pomocí průměrování 16 okolních

4.4 Robust Super-rozlišení

V programovém prostředí Matlab byla vytvořena funkce *SRrobust.m*, která vychází z metod Super-rozlišení, má 6 vstupních parametrů (obraz1, obraz2, obraz3, obraz4, lambda, ostřicí masku) a jeden výstupní (výstupní obraz). Tato funkce pracuje s pomocí funkce *posun_obrazu.m*, kde se provádí registrace obrazu pomocí dvourozměrné diskretní Fourierovy transformace a určí se posun mezi vstupními LR obrazy. Tato funkce má 3 vstupní parametry (sadu LR obrazů, výšku obrazu, délku obrazu) a jeden výstupní (posun).

Blokové schéma funkce *SRrobust.m* je znázorněno níže na Obrázku 13.

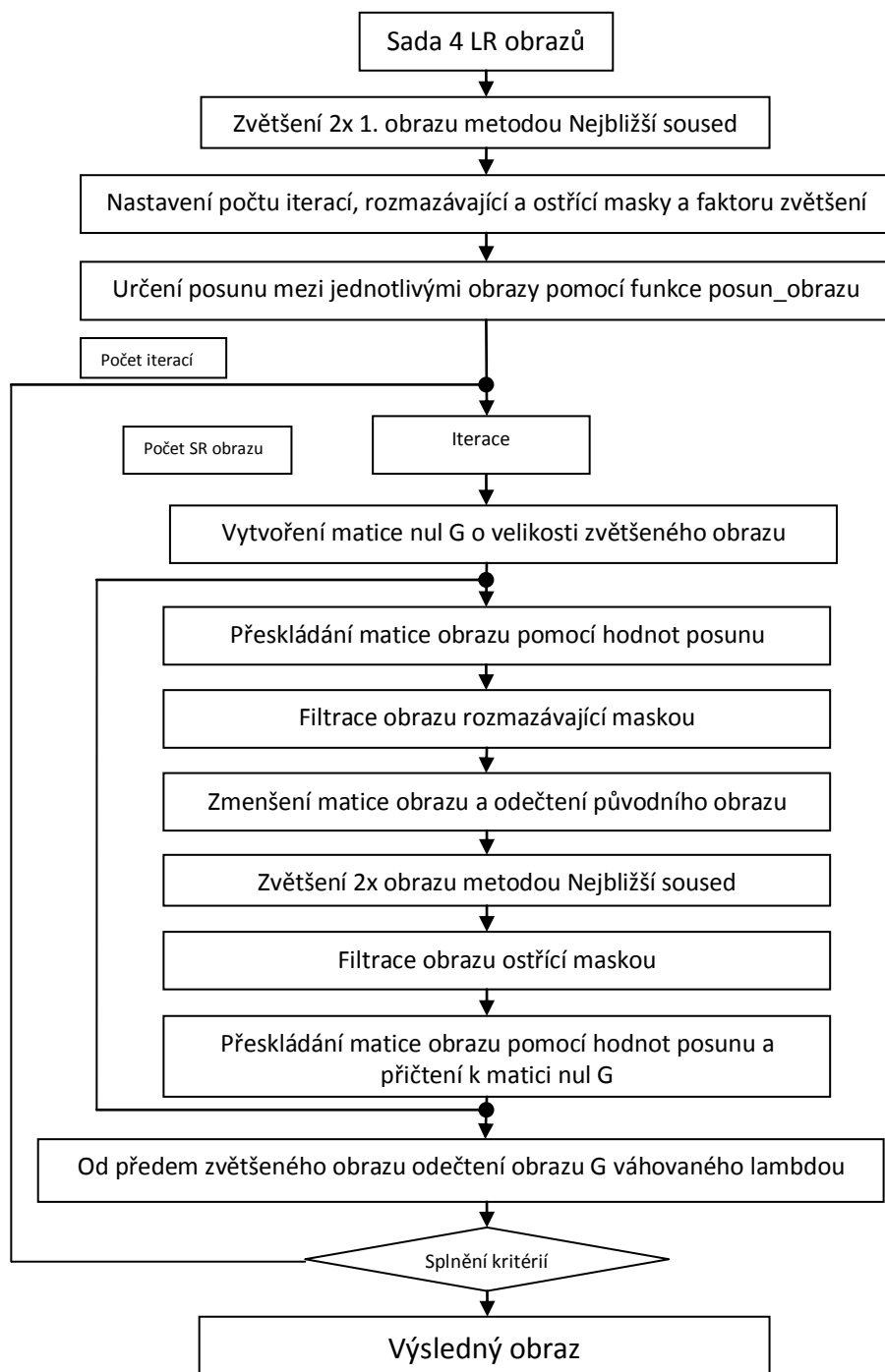


Obrázek 13: Blokové schéma metody Robust

4.5 Iterační zpětná projekce Super-rozlišení

Dále byla vytvořena funkce *SRbackprojection.m*, která vychází z metod Super-rozlišení, má 6 vstupních parametrů (obraz1, obraz2, obraz3, obraz4, lambda, ostřicí masku) a jeden výstupní (výstupní obraz). Tato funkce pracuje také s pomocí funkce *posun_obrazu.m*. Tato i předchozí funkce vychází z aplikace Suprerresolution [25].

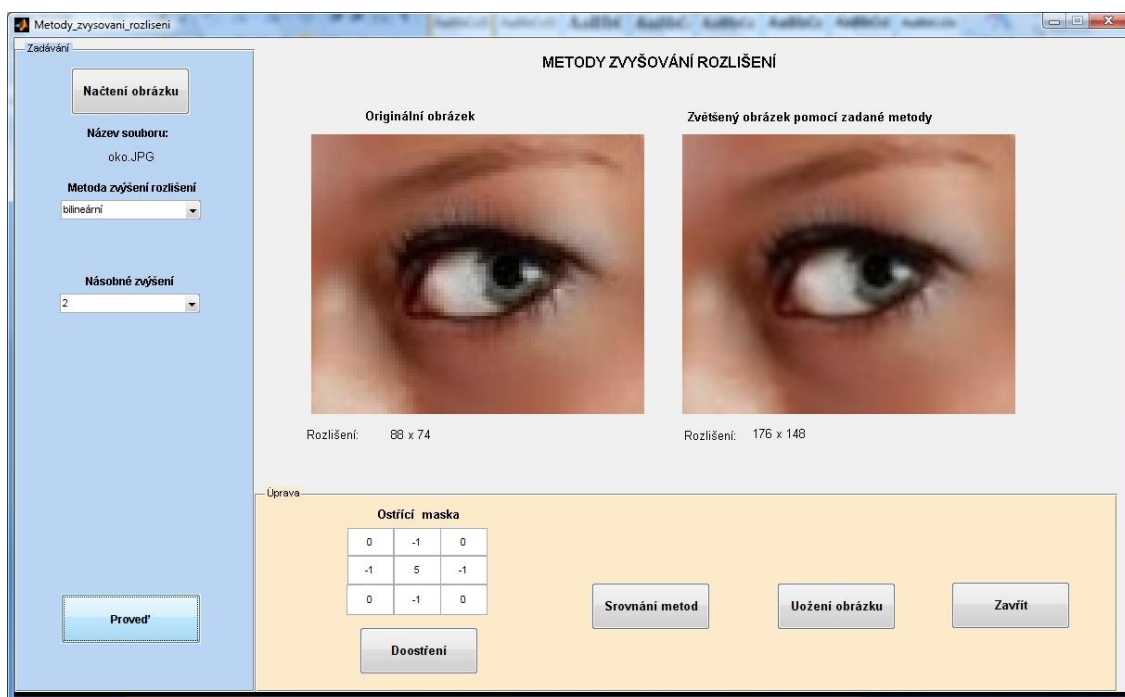
Blokové schéma funkce *SRbackprojection* je znázorněno níže na Obrázku 14.



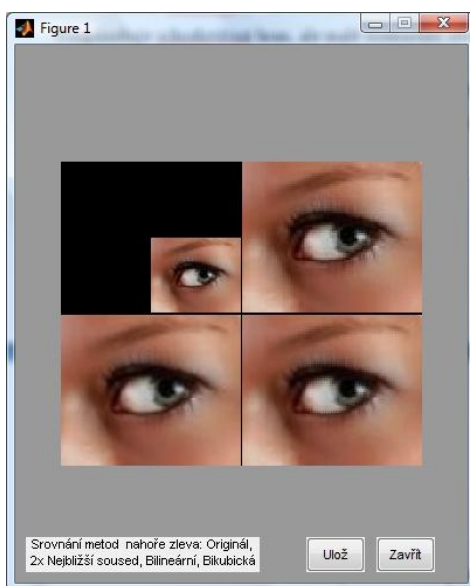
Obrázek 14: Blokové schéma metody Iterační zpětné projekce

4.6 Realizace uživatelského rozhraní

V programu Matlab verze 7.6.0 (R2008a) byla vytvořena aplikace Metody zvyšování rozlišení v prostředí GUI. Aplikace umožňuje načítání barevného i šedotónového obrazu (datového souboru typu .jpg). Pomocí tlačítka Načtení obrázku. Podle názvu souboru se aplikace dělí na interpolační metody zvyšování rozlišení a metody Super-rozlišení. Struktura programu je znázorněna v blokovém schématu. Na Obrázku 15 je vidět grafické uspořádání aplikace a po kliknutí na tlačítko srovnání metod se zobrazí Obrázek 16.

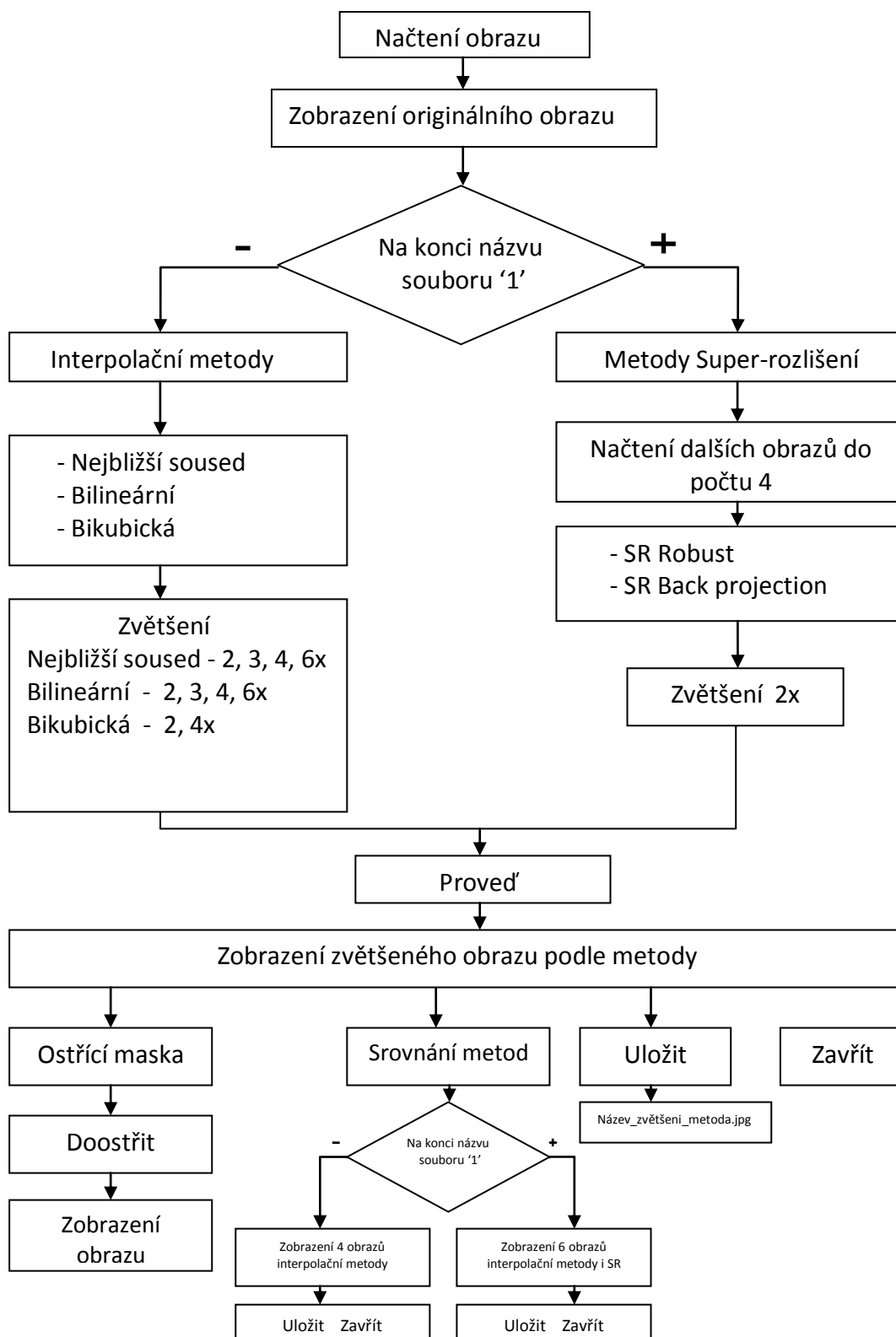


Obrázek 15: Aplikace Metody zvyšování rozlišení



Obrázek 16: Srovnání metod

4.6.1 Blokové schéma aplikace Metody zvyšování rozlišení



Obrázek 17: Blokové schéma aplikace

4.6.2 Popis aplikace

Jak už bylo popsáno, je aplikace rozdělena na metody interpolační a Super-rozlišení. Také je rozdělena na část (panel) zadávání (výběr) metody a další úpravu výsledného obrazu. Při načtení názvu souboru s 1 na konci si aplikace automaticky načte další 3 soubory, pokud jsou k dispozici. Jinak se objeví v programu Matlab chyba. Jsou-li obrazy k dispozici, aplikace je nastavena na metody Super-rozlišení a zobrazí se na panelu zadávání panel s ostřicí maskou. Tato maska je předdefinovaná a lze ji měnit např. podle popisu v kapitole 2.3.1. Maska je jednou ze vstupních hodnot funkce pro Super-rozlišení. Nemá-li soubor na konci názvu 1 je možnost z výběru interpolačních metod.

Tlačítko Srovnání metod lze použít i bez provedení jakéhokoliv nastavení. Zde se zase stejně vyhodnocuje název souboru, který dělí srovnání metod na možnost zobrazení jen interpolačních metod či i Super-rozlišení. U interpolačních metod se počítají jednotlivé metody a zobrazí se okno s obrázkem složeným ze 4, jak je na Obrázku 16. Složený obrázek obsahuje originální a 2x zvětšený pomocí metod. U Super-rozlišení se ještě přidají i tyto metody a výsledný obrázek je složený z 6 obrazů. Tento obraz lze uložit a okno zavřít.

Na panelu úprava lze, při provedení zvětšení rozlišení některou metodou, ještě výsledný obraz doostřit. Pomocí ostřicí masky, která se dá také měnit a tlačítka doostřit. Doostřený obraz se zobrazí v novém okně.

Obráz po provedení zvýšení rozlišení pomocí některé z metod, lze uložit pomocí tlačítka uložení obrázku jako soubor datového typu .jpg. Název tohoto souboru je složen z původního názvu a předchozího nastavení, tedy lze určit, jakou metodou byl originál zvětšen a kolikrát. Pro obraz oko.jpg je příklad níže.

oko_2x_bilinear.jpg

5. Hodnocení kvality obrazu

Metody hodnocení kvality obrazu se dají rozdělit na subjektivní a objektivní. Subjektivní výsledky kvality obrazu jsou dané průměrováním skupiny pozorovatelů, či jedince. Předem je už definovaná nějaká stupnice. V objektivním hodnocení se využívá přesných výpočtů. U obou variant se pro hodnocení používají tzv. testovací obrazy. Ty mohou mít různou vlastnost, např. jednobarevné, textury, proměnnou prostorovou distribuci atd. [24]

5.1 Subjektivní hodnocení

Podle výsledků jednotlivých zvětšených obrázků a použité metodě se dají hodnotit jejich výhody, nevýhody a možnosti použití. Pro lepší hodnocení je vytvořena Tabulka 1 pro interpolační metody a Tabulka 2 pro Super-rozlišení. Pomocí aplikaci Metody zvyšování rozlišení byl vytvořen Obrázek 18, který srovnává metody interpolační i s metodami Super-rozlišení.

Metoda nejbližší soused

Metoda nejbližší soused je nejjednodušší metodou, je také velmi rychlá, ale vede k nežádoucím artefaktům. Nespojitosť v obrazu (při větším zvětšení jsou vidět i jednotlivé pixely). Obraz, ale nerozmazává a určitě se v dnešní době používá např. jako nástroj lupa v obrazových editorech. Je použitelná na všechny typy obrazu.

Metoda bilineární


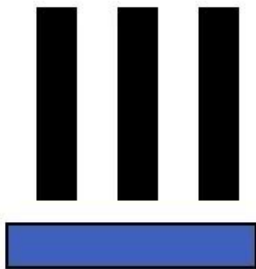





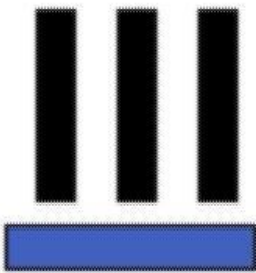


Bilineární interpolace je metoda složitější. Výpočetně je málo náročná a na rozdíl od metody nejbližšího souseda nezpůsobuje schodovitost hran. Díky průměrování jsou hrany plynulé a obraz je vyhlazený, to však způsobuje malé rozmazání obrazu a pokles kontrastu. Také v-okrajích, kde jsou poslední řádky a sloupce stejné, může docházet k artefaktu.

Metoda bikubická


Metoda bikubická je už o hodně složitější na numerické výpočty a proto také i na čas. Nezpůsobuje schodovitost hran, ale malé rozmazání obrazu způsobuje také.

Pro potlačení rozmazání by bylo možné, ještě obraz doostřit, jak je vyzkoušeno v Tabulce 1. O případném doostření je zmíněno v kapitole 2.3.1.

Tabulka 1: Obrázky 2x zvětšené pomocí interpolačních metod

Metoda nejbližší sused			
Metoda bilineární			
Metoda bikubická			
Filtrace obrázku metody bikubické pomocí ostřicí masky $\begin{matrix} 0 & -1 & 0 \\ -1 & 5 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \end{matrix}$			

Tabulka 2: Obrázky 2x zvětšené pomocí metod Super-rozlišení

Originální obraz globus	Zvětšený obraz metodou SR Robust	Zvětšený obraz metodou SR Iterační zpětnou projekcí
		

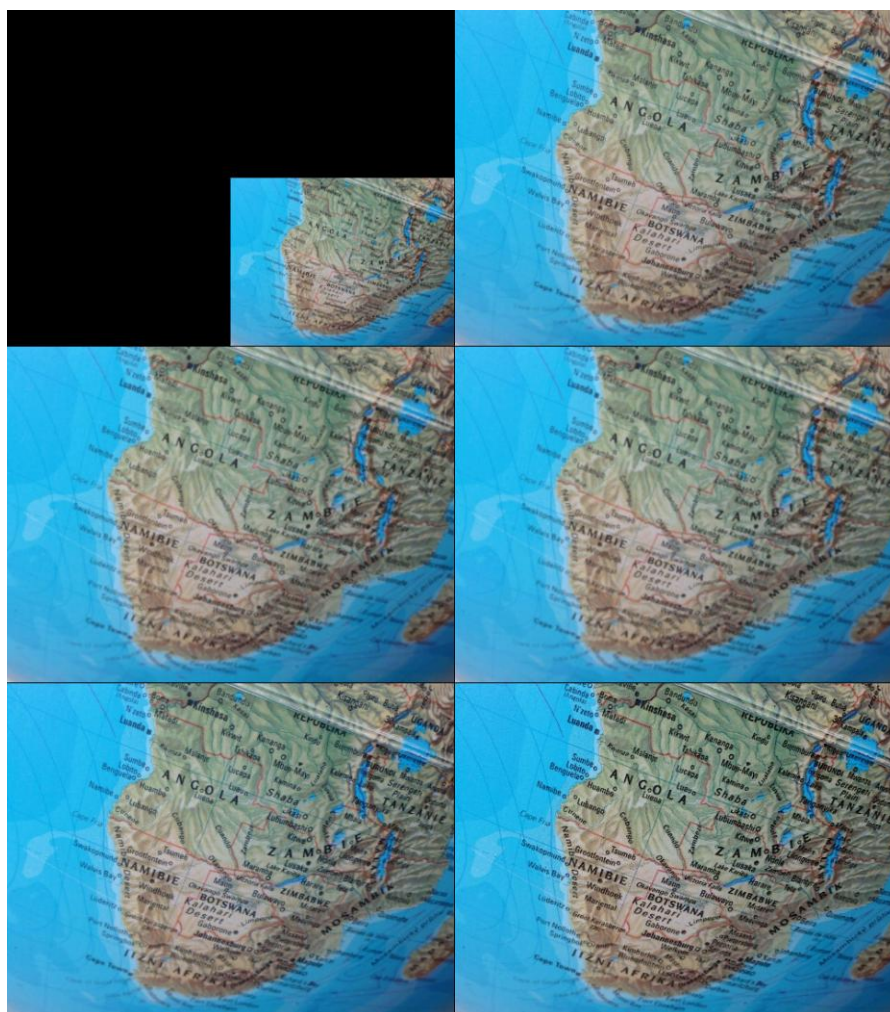
Metoda SR Robust

Díky metodě Super-rozlišení, která používá více obrazů je výsledný obraz daleko ostřejší, než u interpolačních metod viz. Tabulka 2 či levý spodní obraz na Obrázku 18. Avšak použitím mediánu v metodě nedosahuje takových výsledků jako metoda Super-rozlišení Iterační zpětná projekce.

Metoda SR Iterační zpětná projekce

Při zvýšení rozlišení pomocí této metody se zvýrazní převážně černé pixely v textu a je znát lepší kontrast oproti interpolačním metodám. Je lepší i než metoda SR Robust viz. Tabulka 2. Tato metoda je proto vhodná pro obrazy s textem. Obě metody Super-rozlišení jsou početně i časově méně náročné, než bikubická interpolační metoda.

Na Obrázku 18 je shora zleva originální obraz, 2x zvětšený metodou nejbližší soused, bilineární, bikubická, SR Robust, SR Iterační zpětná projekce



Obrázek 18: Srovnání obrazu pomocí metod v aplikaci

5.2 Objektivní hodnocení

U objektivního hodnocení kvality obrazu se používají různé metody měřících výpočtů. Metody hodnotí kvalitu z různých vlastností obrazu a závisí také na testovacím obraze.

5.2.1 Metody

CMSE

Střední kvadratická odchylka dvou barevných obrazů (CMSE – Color Mean Square Error). Tato objektivní metoda je nejjednodušší a nejpoužívanější pro hodnocení digitálního obrazu. Metoda vyjadřuje součet kvadrátů odchylek v jednotlivých pixelech mezi obrazy. Střední kvadratická odchylka je definovaná vzorcem (21) . [24]

Z uvedeného vztahu je zřejmé, že hodnota CMSE může být nulová v případě výpočtu odchylky dvou totožných obrazů. Maximální hodnota, které je možno dosáhnout je 255^2 . Tento teoretický příklad by odpovídal odchylce mezi bílým a černým obrazem.

$$CMSE = \frac{1}{3MN} \left(\sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} \sum_{ch \in Ch} \left(I_{Orig}^{ch}(i,j) - I_{Rec}^{ch}(i,j) \right)^2 \right) \quad (21)$$

CPSNR

Tato metoda CPSNR (Color Peak Signal to Noise Ratio) vychází ze střední kvadratické chyby CMSE pro barevné obrazy. Hodnotí se poměr mezi signálem a šumem v obraze viz. vzorec (22), kde K udává počet kvantizačních úrovní. Pro šedotónový osmibitový i barevný obraz je K=255. Touto metodou se nejčastěji hodnotí veličiny pro porovnávání komprese obrazu. [24]

$$CPSNR = 10 \log \frac{K^2}{CMSE} \quad [dB] \quad (22)$$

MSSIM

Tato metoda vychází z metody SSIM, která hodnotí kvalitu pomocí třech parametrů jasu, kontrastu a struktury mezi originálním a komprimovaným obrazem. Průměrováním SSIM dostaneme výslednou hodnotu MSSIM (Mean SSIM). Tato hodnota je jedno-číselná má hodnotu od 0 do 1 a reprezentuje shodnost obrazu. Výpočet je dán vzorcem (23). [24]


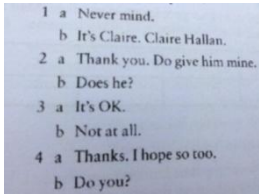

$$MSSIM(X, Y) = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M SSIM(x_j, y_j)$$

(23)

5.2.2 Hodnocení zvětšených obrazů

Pro objektivní hodnocení obrazu byla implementována do programu Matlab metoda CMSE a CPSNR. Testované obrazy a hodnoty veličin jsou v Tabulce 3. Hodnocení bylo provedeno k originálnímu obraz vůči obrazu zmenšenému a 2x zvětšeného pomocí metod.

Tabulka 3: Objektivní hodnocení metodou CMSE

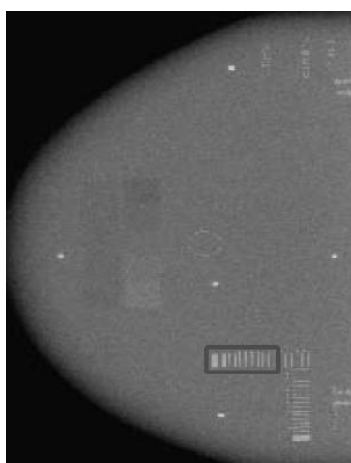
Originální obraz						
Veličina	CMSE	CPSNR [dB]	CMSE	CPSNR [dB]	CMSE	CPSNR [dB]
nejbližší soused	32.0936	15.0642	10.5439	10.2300	97.0067	19.8680
bilineární	42.3269	16.2662	10.2840	10.1216	117.7338	20.7090
bikubická	45.2792	16.5590	13.8012	11.3992	128.6896	21.0954
SR Robust	-	-	82.2855	19.1532	165.0853	22.1771
SR Iterační zpětná projekce	-	-	289.2406	24.6126	476.6246	26.7818

Hodnoty veličin CMSE a CPSNR neposkytují pro testované obrazy objektivní hodnocení mezi metodami interpolačními a Super-rozlišením, to může být dáno velikostí obrazu a strukturou. Na obrazu, kde je text a poměrně velká plocha do značné míry jednotné barvy, vykazuje veličina CMSE lepších hodnot, než u obrazu globusu. U obrazu ruky bylo provedeno jen hodnocení pro interpolační metody.

6. Použití metody Super-rozlišení na lékařské snímky

V lékařské medicíně existuje řada zobrazovacích metod, některé z nich poskytují anatomické zobrazení a umožňují odhalit strukturu lidského těla, jiné poskytují i funkční zobrazení činnosti. Každý zobrazovací systém má charakteristické rozlišení dané základním fyzikálním omezením detektorů, ty zase závisí na poměru signálu k šumu a časové úvaze. Cílem systému je zvýšit rozlišení a tím tak dosáhnout skutečného izotropního 3D obrazu i bez významných změn hardwarového vybavení. K dosažení tohoto cíle mohou sloužit metody Super-rozlišení. V posledních letech nově roste výzkum SR metod v klíčových lékařských modalitách včetně magnetické rezonance (MRI), fMRI a pozitronové tomografie (PET). [18]

V knize Super-resolution imaging [18] jsou popisované dva algoritmy pro zlepšení rozlišení obrazu. První se zabývá zlepšením obrazu digitální mamografie při sníženém rentgenovém záření. Mamografie zachycuje digitální obraz prsu Obrázek 19. Kdy sbírka (sada) obrazu musí obsahovat vzájemný posun. Posuny mezi obrazy vyplývají z pacientova pohybu, kolísání detektorů a vibrací zobrazovacího systému.



Obrázek 19: Digitální mamografie

Další se zabývá optickou spojitou tomografií (OCT), která poskytuje neinvazivní a přesto vysokou rozlišovací schopnost struktury sítnicového pigmentu.[18]

Můj osobní pohled na zpracovávání snímků z lékařských modalit je pozitivní, avšak při různých rekonstrukcích a zpracovávání zlepšení obrazu se dá předpokládat, že se do obrazu vkládají uměle vytvořené informace. Tyto informace mohou vést ke špatné diagnostice lékaře. Tento fakt se bude muset při dalších výzkumech a zlepšování možností nějak vhodně interpretovat.

Závěr

V závěrečné kapitole bych rád poukázal na shrnutí a dosažené výsledky. Úkolem bylo se dozvědět, jak vlastně funguje celý proces zvýšení rozlišení digitálního snímku a něco se dozvědět o jednotlivých metodách.

Také jsem si vyzkoušel vybrané metody realizovat pomocí programového prostředí Matlab, kde jsem navrhnul funkci *zvětšen.m* pro několikanásobné zvětšení rozlišení snímku pomocí tří metod nejbližšího souseda, bilineární interpolace a bikubické interpolace. Dále se zaměřil i na metody Super-rozlišení a dvě z nich implementoval do Matlabu. Vytvořil aplikaci v Matlabu v prostředí GUI, která s těmito funkcemi pracuje. Touto aplikací jsem nechal zvětšit obrázky a z nich pak vytvořil subjektivní a objektivní zhodnocení. Metoda nejbližší soused je nejjednodušší a velice rychlá, při bikubické interpolaci, kde už jsou složitější matematické operace, se doba výsledného obrázku o hodně prodloužila. Metody Super-rozlišení vykazují lepší kontrast a ostrost obrazu, než metody interpolační. Výše uvedená implementace do programového prostředí Matlab byla také méně výpočetně náročná. Výsledky jednotlivých metod byly srovnány také pomocí objektivních kritérií. V tomto srovnání není dostatečně průkazné zlepšení použitím metod Super-rozlišení. Dále je diskutována možnost využití těchto metod v medicíně pro lékařské zobrazovací systémy, u kterých je kvalita a rozlišení obrazu rozhodující pro diagnostiku pacientů.

Přesvědčil jsem se, že při metodách, které počítají neznámí pixel pomocí okolních bodů, dochází k rozmazání hran a to způsobuje nepatrné rozostření. Tenhle artefakt by se dal eliminovat pomocí filtru, které zostří výsledný snímek. Nebo také pomocí metod super-rozlišení, o kterých bylo zmíněno v kapitole 2.4 a 3.

Seznam literatury

- [1] NOVÁK, Radim . *Transformace obrazu* [online]. Brno, 2008. 37 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně . Dostupné z WWW: <<http://www.fit.vutbr.cz/study/DP/rpfile.php?id=6234>>
- [2] HAVELKA, Jan. *Geometrické transformace obrazu* [online]. Brno, 2008. 33 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Dostupné z WWW: <www.fit.vutbr.cz/study/DP/rpfile.php?id=6290>.
- [3] GLASNER, Daniel; BAGON, Shai; IRANI, Michal. *Super-Resolution from a Single Image* [online]. Israel, 8s. Dept. of Computer Science and Applied Mathematics The Weizmann Institute of Science Rehovot 76100 Dostupné z WWW: <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.159.51&rep=rep1&type=pdf>>
- [4] BRUCHANOV, Martin. *Základy zpracování obrazů* [online]. [cit. 2009-03-23]. Dostupné z WWW: <http://bruxy.regnet.cz/programming/zaklady_zpracovani_obrazu.pdf>.
- [5] CHALOUPECKÝ, V. *Počítačová grafika – Geometrické transformace diskrétního obrazu* [online]. Dostupné z WWW: <<http://kmlinux.fjfi.cvut.cz/~haiduada/pogr-05-transformaceobrazu.pdf>>.
- [6] PIHAN, Roman. *Fotografovani.cz* [online]. 2006 [cit. 2006-07-14]. Zpracování obrazu - 1. Rozlišení a tisk. Dostupné z WWW: <http://www.fotografovani.cz/art/fo_upravy/rom_proces1.html>.
- [7] POLÁČEK, Daniel. *Fotografovani.cz* [online]. 2008 [cit. 2008-12-03]. Photoshop tutorial: Technologie „SUPERrozlišení“ ve Photoshopu. Dostupné z WWW: <http://www.fotografovani.cz/art/fo_upravy/SUPERrozliseni-Photoshop-tutorial.html>.
- [8] SLAVÍČEK, Tomáš . *DIGIarena.cz* [online]. 2007 [cit. 2007-06-14]. Všudypřítomná interpolace. Dostupné z WWW: <<http://digiarena.e15.cz/vsudypritomna-interpolace>>.
- [9] PIHAN, Roman . *FotoRoman* [online]. 2010 [cit. 2010]. interpolace (interpolation), převzorkování (resampling). Dostupné z WWW: <http://www.fotoroman.cz/glossary2/3_interpolace.htm>.
- [10] KREJČÍ, Richard. *Gafika On-line* [online]. 2003 [cit. 2003-01-13]. Schodová interpolace: kvalitní změna velikosti bitmapové grafiky. Dostupné z WWW: <<http://www.grafika.cz/art/polygrafie/interpolace.html>>. ISSN 1212-9569.
- [11] GONZALEZ, Rafael C.; WOODS, Richard E.; EDDINS, Steven L. *Digital Image Processing using Matlab*. Prentice Hall, 2004. 624 s.
- [12] JAN, J. *Medical Image Processing, Reconstruction and Restoration: Concepts and Methods*. Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2006. ISBN: 0-8247-5849-8 .

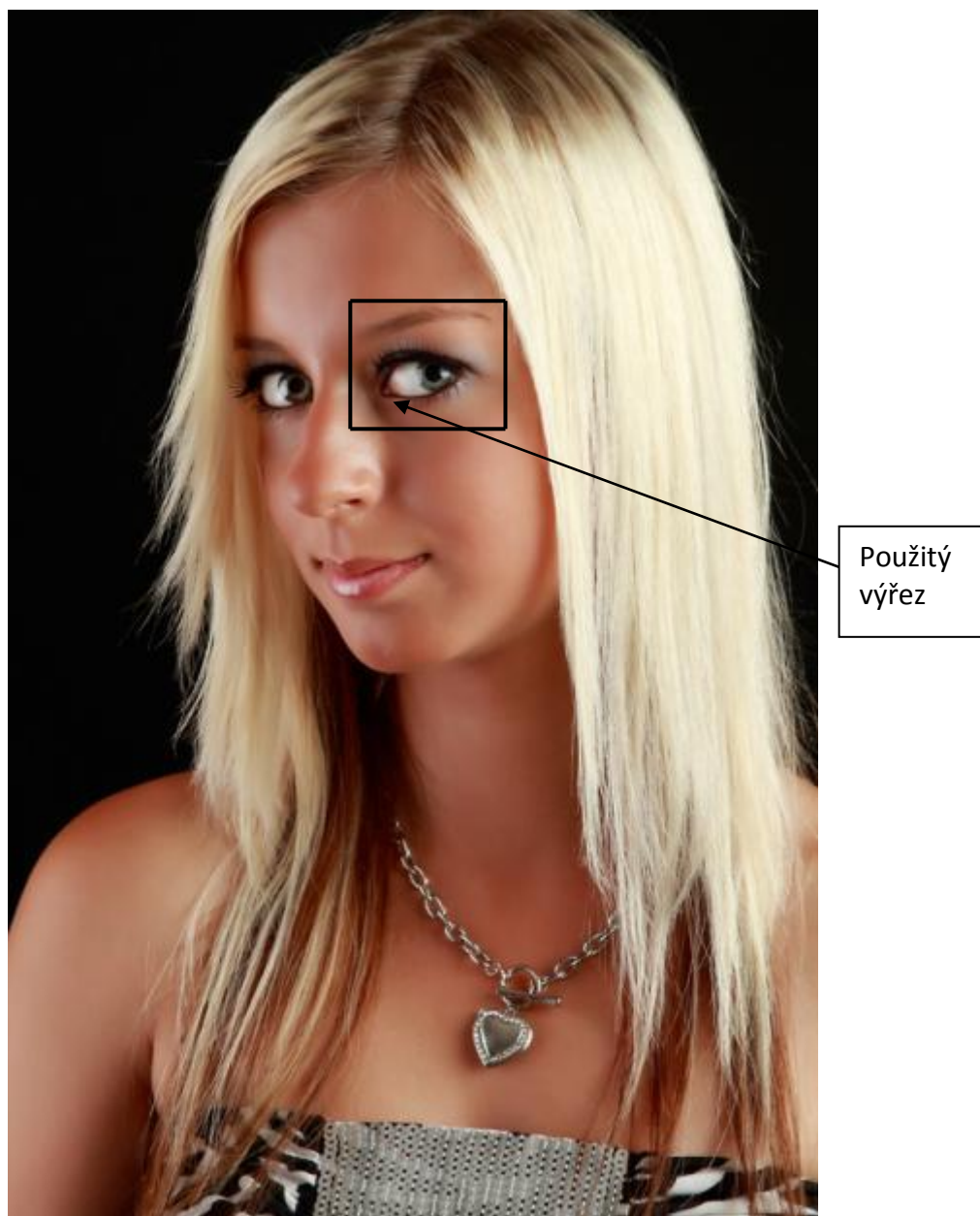
- [13] PEŇÁZ, Tomáš. Počítačová grafika a CAD. Dostupné z WWW: < http://gisak.vsb.cz/~pen63/grafika/Pocitacova_grafika_a_CAD.pdf>.
- [14] OBR, Vítězslav. Možnosti využití DTP skenerů ve fotogrammetrii. *Czech Technical University in Prague* [online]. Dostupné z WWW: <http://www.fce.vutbr.cz/veda/dk2004texty/pdf/06_Geodezie%20a%20kartografie/6_01_Prakticke%20aspekty%20geodezie%20a%20kartografie/Obr_Vitezslav.pdf>.
- [15] PHAM, Tuan Q. Robust Super-Resolution by Minimizing . *IOP Publishing Ltd* [online]. 2008, Dostupné z WWW: < <http://repository.tudelft.nl/assets/uuid:4b548b58-e4bf-40af-a74f-92f89d2d7e91/Robust%20super-resolution%20by%20minimizing%20a%20Gaussian-weighted%20L2%20error%20norm.pdf>>.
- [16] FARSIU, Sina; ROBINSON, Dirk. *Fast and Robust Multiframe Super Resolution* [online]. 2004. 18 s Dostupné z WWW: <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.90.7790&rep=rep1&type=pdf>>
- [17] ZOMET, Assaf . *Robust Super-Resolution* [online]. Israel, 2001. 6 s. Diplomová práce. School of Computer Science and Engineering. Dostupné z WWW: <<http://www.cs.huji.ac.il/~peleg/papers/cvpr01-RobustSR.pdf>>. ISBN0-7695-12720/01.
- [18] MILANFAR, Peyman . *SUPER-RESOLUTION IMAGING*. 2011. Boca Raton, London : CRC Press, Taylor & Francis Group, 2011. 472 s.
- [19] Two Dimensional Fast Fourier Transformation. [online]. [cit. 2011-05-21]. Dostupné z WWW: <<http://www.porous-35.com/appendix-4.html>>.
- [20] BAŘTIPÁN, Jan . *Filtrace snímků ve frekvenční oblasti : Rychlá fourierova transformace* [online]. ZCU v Plzni : 12 s. Semestrální práce. Dostupné z WWW: <<http://www.bartipan.net/zvi/fft.pdf>>.
- [21] KUMAR CHAURASIA, Avinash . *Super-resolution from Image Sequence* [online]. Kanpur Oborová práce. Indian Institute of Technology. Dostupné z WWW: <<http://www.cse.iitk.ac.in/users/mudgalp/report.pdf>>.
- [22] DEEPESH, Jain. *Superresolution using Papoulis-Gerchberg Algorithm* [online]. Oborová práce. Stanford University. Dostupné z WWW: <http://www.stanford.edu/class/ee392j/Winter2004/.../ee392j_project.doc>.
- [23] GUR, Eran . *Single-Image Digital Super-Resolution* [online]. 2007. Oborová práce. International Journal of Computer Science Dostupné z WWW: <http://www.iaeng.org/IJCS/issues_v34/issue_2/IJCS_34_2_14.pdf>.
- [24] DVOŘÁK, Josef . *Porovnání obrazových kompresních algoritmů s využitím* [online]. 2010. 60 s. Bakalářská práce. ČVUT v Praze. Dostupné z WWW: <https://dip.felk.cvut.cz/browse/pdfcache/dvorajo2_2010bach.pdf>.
- [25] EPFL [online]. [cit. 2011-05-23]. Super-Resolution. Dostupné z WWW: <<http://lcav.epfl.ch/software/superresolution/index.html>>.
- [26] Obrázek 20. Dostupné z WWW: <<http://prahacity.olx.cz/fotomodelink-iid-104963002>>

Přílohy

A. Výsledky interpolačních metod v Matlabu

Pro srovnání jednotlivých metod bylo pomocí vytvořených funkcí provedeno testování a to zvětšením rozlišení obrazu pomocí všech metod v měřítku 2x a 4x.

Pro první obrázek byl vybrán výřez oka, který je znázorněn na Obrázku 20.



Použitý
výřez

Obrázek 20: Obrázek a výřez, který je použit jako originál [26]

Metoda nejbližší soused



Obrázek 21: Pomocí metody nejbližší soused zvětšení originálního obrazu

Metoda bilineární



Obrázek 22: Pomocí metody bilineární zvětšení originálního obrazu

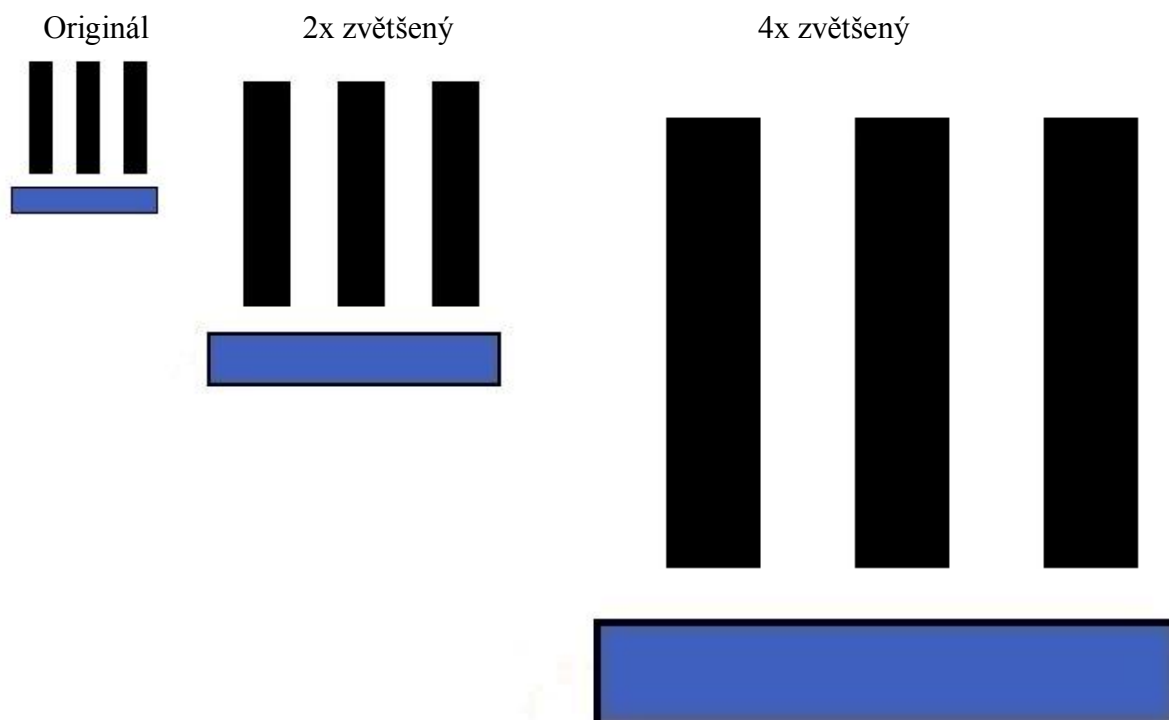
Metoda bikubická



Obrázek 23: Pomocí metody bikubické zvětšení originálního obrazu

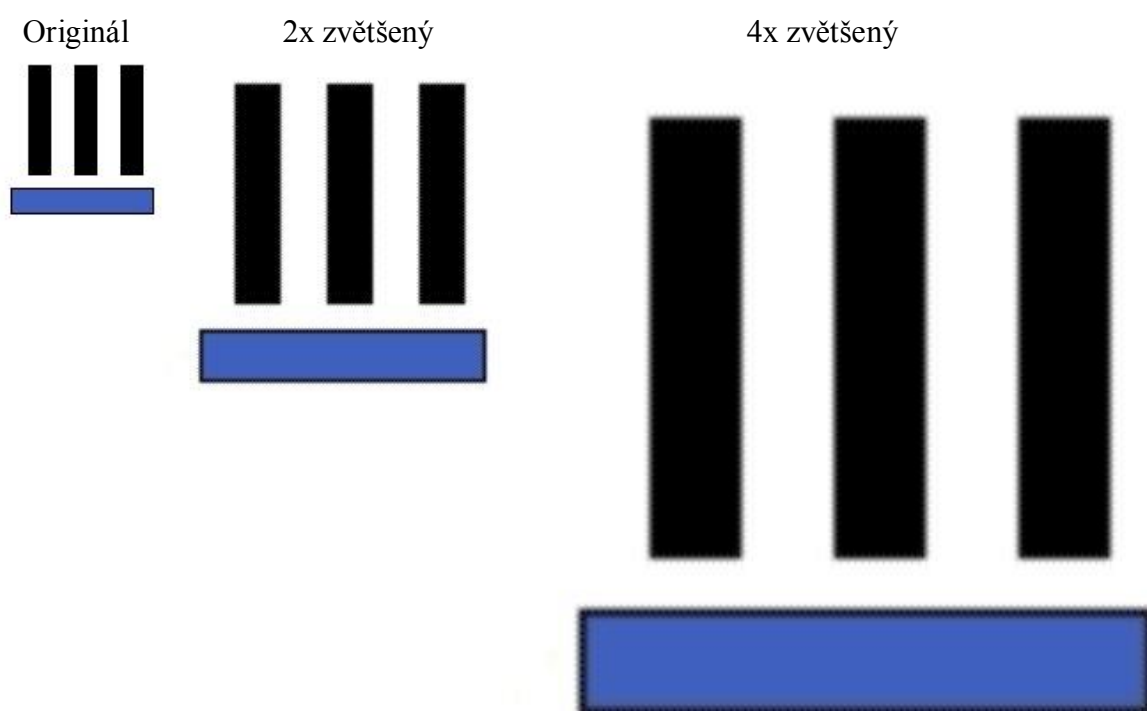
Druhý obrázek byl vytvořen, aby bylo vidět lepší přechod hran (rozmazání).

Metoda nejblížeší soused



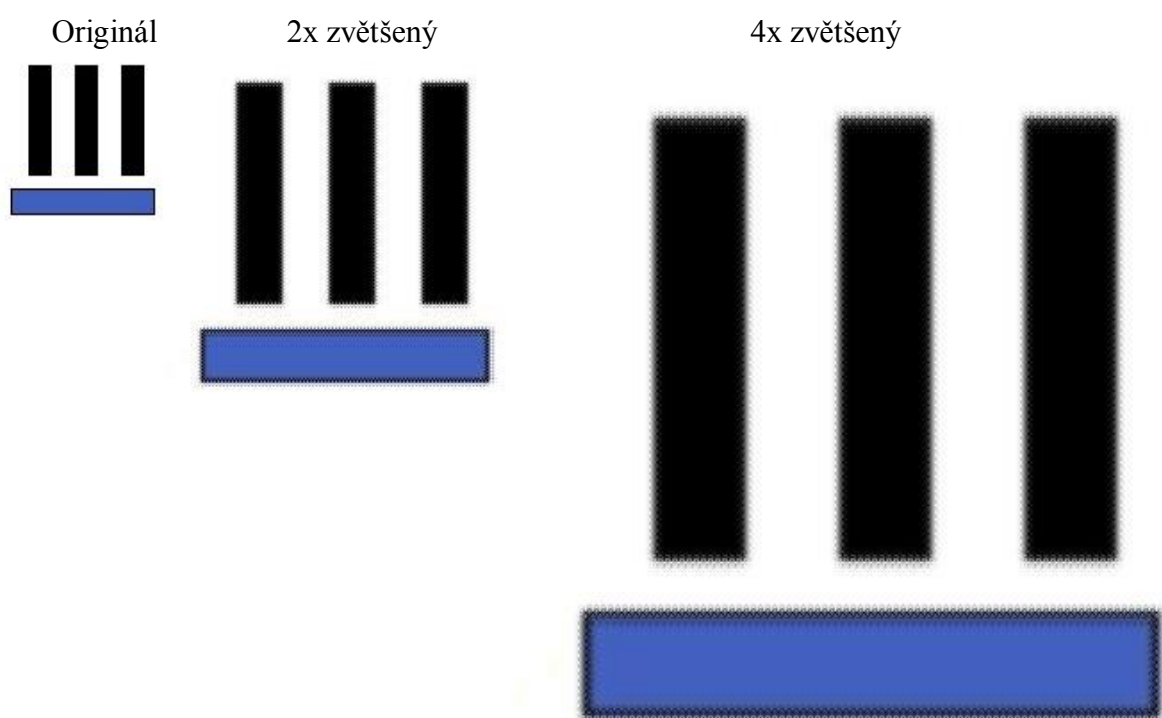
Obrázek 24: Metoda nejblížeší soused zvětšení originálního obrazu2

Metoda bilineární



Obrázek 25: Metoda bilineární zvětšení originálního obrazu2

Metoda bikubická



Obrázek 26: Metoda bikubická zvětšení originálního obrazu2

Další testování zvyšování rozlišení obrazu bylo provedeno v navržené a dříve popsané aplikaci v Matlabu viz. kapitola 4.6.

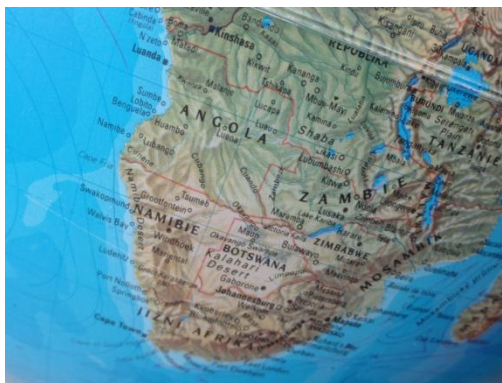
Na Obrázku 27 je srovnání interpolačních metod, kde je shora zleva originální obraz a pro srovnání byl 2x zmenšen a použit v aplikaci, 2x zvětšen nejblížeším sousedem, bilineární, bikubickou.



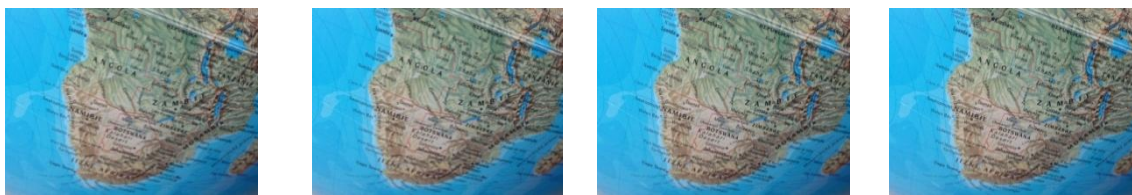
Obrázek 27: Srovnání interpolačních metod obrazu ruky

B. Výsledky metod Super-rozlišení v Matlabu

Pro metodu Super-rozlišení byla použita sada 4 obrazů Obrázek 29 a pro srovnání Obrázek 28, který má stejné rozlišení jako obrazy zvětšené aplikací v Matlabu.



Obrázek 28: Originální obraz globus



Obrázek 29: Sada čtyř LR obrazů

Tabulka 4: Srovnání obrazu metod Super-rozlišení s originálním

<p>Originální obraz globus</p>	
<p>Zvětšeny obraz metodou SR Robust</p>	
<p>Zvětšeny obraz metodou SR Iterační zpětnou projekcí</p>	